

УДК 622.692.4.05:536.1

## ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ НАЗЕМНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ

О.І.Вольченко, А.В.Мойсишин, Н.В.Мойсишин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 42123,  
e-mail: [meshch@nuing.edu.ua](mailto:meshch@nuing.edu.ua)

*Розглядаються методи нагрівання та охолодження ділянок трубопроводів в експериментальних камерах. Результатом роботи є можливість оцінки втрат теплоти в наземних трубопроводах для транспортування газових і нафтових продуктів, а також продуктів хімічного виробництва температурним методом для визначення коефіцієнтів тепловіддачі при природній і вимушеній конвекції, випромінюванні, а також кондуктивному теплообміні для вибору раціональної товщини теплоізоляції трубопроводу.*

Ключові слова: трубопровід, теплопровідність, тепловий баланс, нагрівання, охолодження, товщина теплоізоляції.

*Рассмотрены методы нагревания и охлаждения участков трубопроводов в экспериментальных камерах. Результатом работы является возможность оценки потерь теплоты в наземных трубопроводах для транспортировки газовых и нефтяных продуктов, а также продуктов химического производства температурным методом для определения коэффициентов теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекции, лучеиспусканием, а также кондуктивным теплообменом для выбора рациональной толщины теплоизоляции на трубопроводе*

Ключевые слова: трубопровод, теплопроводность, тепловой баланс, нагревание, охлаждение, толщина теплоизоляции.

*The methods of heating and cooling of areas of pipelines in experimental chambers are considered. Possibility of estimation of losses of warmth in the ground pipelines for transporting of gas oil products, and also products of chemical production by a temperature method for determination of coefficients of heat emission at natural and forced convection and radiation, and also conductive heat exchange for the choice of rational thickness of teploizolyatsii on a pipeline is a technical job performance.*

Keywords: pipeline, heat conductivity, thermal balance, heating, cooling, thickness of heat isolation.

### Актуальність роботи

Досвід експлуатації трубопроводів наземного призначення свідчить, що надійність, пропускна здатність, енерговитрати на транспортування вуглеводнів суттєво залежать від їхніх теплових режимів.

Відомі методи визначення кількості теплоти (калориметрія) базуються на використанні різних типів калориметрів [1], а саме:

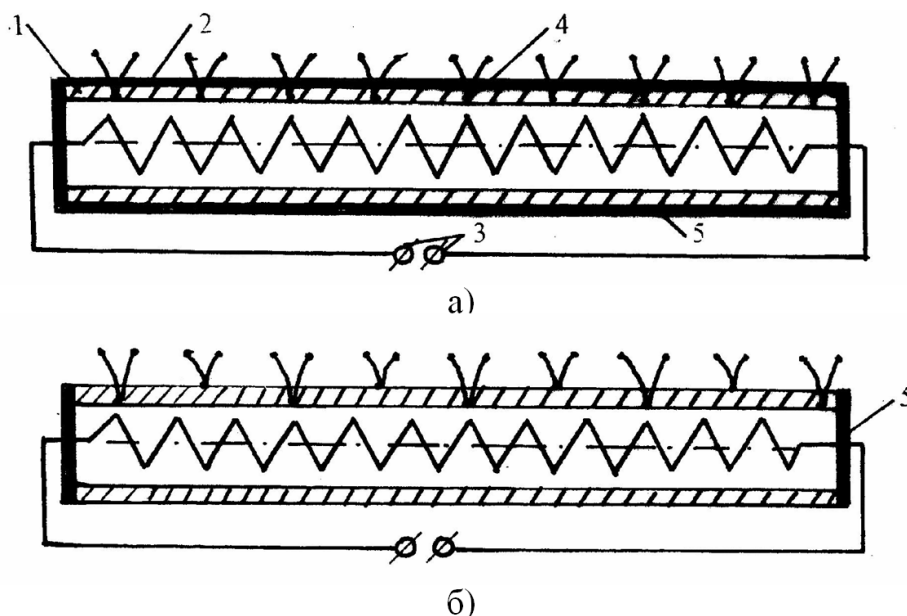
- звичайний калориметр змінної температури з ізотермічною оболонкою;
- масивний калориметр змінної температури з ізотермічною оболонкою;
- калориметр змінної температури з адіабатичною оболонкою;
- диференціальний калориметр зі змінною температурою;
- калориметр постійної температури.

Однак запропоновані методи визначення частки акумульованої і розсіяваної в довкілля наземним трубопроводом при транспортуванні пари, газу або рідини теплоти не можуть бути використані через низку причин:

- велику довжину і вагу трубопроводу;
- неможливість окремо оцінити інтенсивність природного і вимушеного конвективного охолодження внутрішньої і зовнішньої поверхонь трубопроводу;
- неможливість точного визначення втрат тепла в трубопроводі від кондуктивної складової теплообміну.

Задачу теплопровідності циліндричної оболонки можна розв'язувати аналітичним, чисельним, аналоговим, графічним або експериментальними методами. За допомогою вказаних методів визначають значення температур в досліджуваних циліндричних оболонках розрахунковим або експериментальним шляхом [2]. В залежностях для розрахунку кількості теплоти, що відводиться з поверхонь трубопроводу, необхідно знати не тільки різницю температур  $(t_1 - t_{c1})$  і  $(t_2 - t_{c2})$  (де  $t_1, t_2$  – температури внутрішньої та зовнішньої поверхонь трубопроводу;  $t_{c1}, t_{c2}$  – температури середовищ, з якими ці поверхні межують), але й коефіцієнти інтенсивності процесів, тобто тепловіддачі при природній і вимушеній конвекції. Що ж стосується визначення втрат теплоти, що враховують кондуктивну складову теплообміну в самому трубопроводі, то вона майже ніколи не визначається. За відомими поверхневою і об'ємною температурами трубопроводу в процесі його експлуатації можна правильно оцінити його тепловий баланс у складному теплообміні, правильно вибрати матеріал теплоізоляції та її товщину.

Ділянка трубопроводу при проходженні через неї газу або нафтопродуктів є теплообмінником. Проте відомі рівняння теплового балансу для елементарної ділянки поверхні теплопередачі не враховують теплових втрат у ній [3].



1 – циліндрична труба, 2 – нагрівальний пристрій, 3 – клеми електричного кола, 4 – електроди термодпар, 5 – теплоізоляція

**Рисунок 1 – Конструкції теплоізольованої (а) та нетеплоізольованої (б) ділянок трубопроводу з нагрівальними пристроями**

Недолік наявних методів розрахунку полягає в тому, що при визначенні втрат теплоти в досліджуваному об'єкті необхідно знати поверхневі, а також об'ємні температури і коефіцієнти тепловіддачі при природній і вимушеній конвекції та випромінюванні. Перші розраховуються, а другі приймаються як деякі усереднені величини (за даними довідкової літератури).

#### Мета і постановка задачі дослідження

Метою пропонованої роботи є визначення втрат теплоти ділянкою наземного трубопроводу для знаходження коефіцієнтів тепловіддачі при природній і вимушеній конвекції, випромінюванні, а також кондуктивному теплообміну з метою правильного вибору товщини теплоізоляції зовнішньої поверхні трубопроводу під час його експлуатації за температури навколишнього середовища.

Поставленої мети досягають так. В лабораторних умовах нагрівають теплоізольовану від навколишнього середовища (першу) і нетеплоізольовану (другу) ділянки трубопроводів за допомогою електричних нагрівальних пристроїв, що працюють однакові проміжки часу, і через співвідношення їх об'ємних температур  $\frac{t_2 - t_0}{t_1}$  (замірюються термодпарами) за залеж-

ністю вигляду  $1 - \frac{t_2 - t_0}{t_1}$  визначають частку теплоти, що витрачається на кондуктивну складову теплообміну, тобто на нагрівання ділянки трубопроводу. Після цього другу ділянку тру-

бопроводу охолоджують до температури довкілля, і за одержаними даними визначають коефіцієнт тепловіддачі при випромінюванні та природній конвекції з поверхонь ділянки циліндричної труби. Далі ділянки циліндричних труб поміщають у випробну камеру експериментальної установки і через них по черговому пропускають підігріті газ або рідину і через співвідношення виміряних об'ємних температур другої труби ( $t_2 - t_0$ ) до першої ( $t_1$ ) при однаковій складовій кондуктивного теплообміну

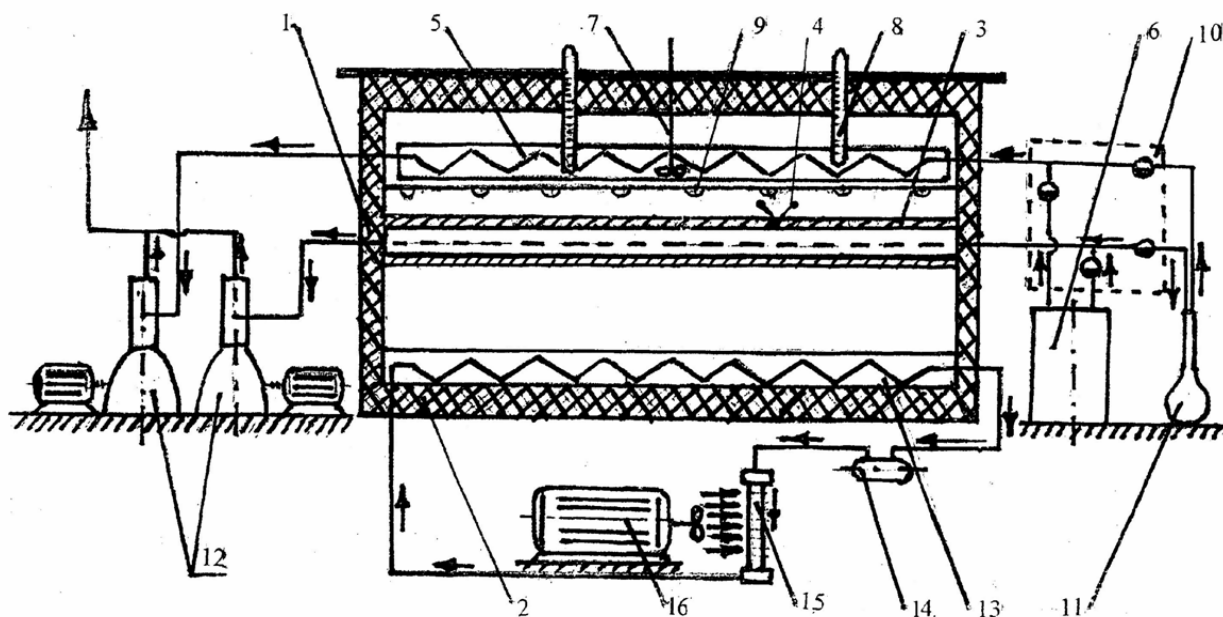
за залежністю вигляду  $1 - \frac{t_2 - t_0}{t_1}$  визначають частку теплоти, що розсіюється в довкілля випромінюванням і природним або вимушеним конвективним теплообміном з поверхонь другої циліндричної труби.

#### Про експериментальну установку та методи нагрівання і охолодження ділянок трубопроводів

Методи нагрівання та охолодження ділянок трубопроводів наземного призначення для оцінювання їх теплового балансу полягають у визначенні втрат теплоти з поверхонь труби внаслідок випромінювання, природної і вимушеної конвекції та кондуктивним теплообміном.

На рис.1 зображено конструкції теплоізольованої і нетеплоізольованої ділянок трубопроводу з нагрівальними пристроями, а на рис. 2 – експериментальну установку з випробною камерою для ділянок трубопроводів.

Згідно з рис.1 в циліндричну трубу 1 поміщають нагрівальний пристрій 2, підключений



1 – камера, 2 – теплоізоляція, 3 – труба, 4 – електроди термопар, 5 – теплообмінник, 6 – електропечі, 7 – пристрій для перемішування повітря, 8 – термометр, 9 – сопла, 10 – вузол перемикачів потоків повітря, 11 – посудина Дьюара, 12 – вакуумний насос, 13 – теплообмінник, 14 – шестерінчастий насос, 15 – холодильник, 16 – вентилятор

**Рисунок 2 – Принципова схема експериментальної установки для моделювання теплового стану ділянки трубопроводу**

до клем 3 електричного кола. При цьому в першій трубі, повністю покритій теплоізоляцією 5, гарячі спаї термопар 4 виведені з її внутрішньої поверхнею. У другій трубі 1 гарячі спаї термопар виведені з її внутрішньої і зовнішньої поверхонь, при цьому теплоізованими є тільки торці труби 1.

Електроди термопар 4 підключаються до реєструючої апаратури (на рис. не зображена) для фіксування термоЕРС, яку за тарувальним графіком можна перевести в температуру. Перед нагріванням в лабораторних умовах труби 1 кладуть на підставки, виготовлені з матеріалу із низькою теплопровідністю, наприклад ебоніту або текстоліту.

На рис. 2 зображено експериментальну установку для моделювання теплового стану ділянки трубопроводу, призначеної для імітації газопроводу або нафтопроводу. Установка має камеру 1, покриту із зовнішнього боку теплоізоляцією 2. В камері 1 розміщено трубу 3, в стінки якої вмонтовано електроди термопар 4, виведені назовні. У верхній частині трубопроводу 3 розміщується теплообмінник 5, який за допомогою електропечі 6 забезпечує нагрівання повітря, що подається в камеру 1. Перемішування повітря в камері здійснюється пристроєм 7. Температура повітря в теплообміннику 5 контролюється за допомогою термометрів 8. Обдування поверхні труби повітрям здійснюється за допомогою сопел 9. Електропечі 6 зв'язана з вузлом перемикачів потоків повітря 10 на теплообмінник 5 і трубу 3, кінці циркуляційних контурів яких заведені в посудину Дьюара 11. Остання – це колба з подвійними посрі-

бленими стінками, з простору між якими викачано повітря. Теплопровідність розрідженого газу між стінками є настільки малою, що температура повітря, яке проходить через цю посудину, залишається постійною досить тривалий проміжок часу. Через значні об'єми повітря посудину Дьюара виконано з металу. Таким чином, в камері 1 підтримується постійна температура навколишнього середовища вища  $0^{\circ}\text{C}$ .

У трубі 3 за рахунок прокачування вакуумним насосом 12 азоту або підігрітого повітря підтримується температура, що відповідає температурі газу в трубопроводі у природних умовах, тобто в умовах, коли транспортований газ після компресорної системи охолоджується в апаратах повітряного охолодження.

Під трубою 3 вставлено теплообмінник 13, який опирається на внутрішню стінку камери 1 і входить до самостійного контуру з шестерінчастим насосом 14 і холодильником 15. Останній охолоджується вентилятором 16. Таким чином, в камері 1 підтримується постійна температура навколишнього середовища нижча  $0^{\circ}\text{C}$ .

Методи нагрівання і охолодження ділянок трубопроводів здійснюються в лабораторних умовах у три етапи.

*Перший етап.* Визначаються втрати теплоти кондуктивним теплообміном. При цьому за допомогою клем 3 в електричну мережу одночасно підключають нагрівальні пристрої 2 у двох трубах 1. Нагрівальний пристрій 2 забезпечує нагрівання тіла першої труби 1, тобто термопар 4 покажуть температуру вищу, ніж термопар 4 другої труби. Це пояснюється тим, що наявність повної теплоізоляції 5 першої

труби виключає дві складові теплового балансу – природний конвективний теплообмін та випромінювання з її поверхні в довкілля. Після цього через співвідношення поверхневих температур труб 1  $\frac{t_2 - t_0}{t_1}$  за залежністю

$1 - \frac{t_2 - t_0}{t_1}$  визначають частку теплоти, що витрачається на кондуктивну складову теплообміну, тобто на нагрівання ділянки трубопроводу. Так, наприклад, при співвідношенні вказаних температур  $\frac{100 - 20}{50}$  частка теплоти, що

витрачається на кондуктивний теплообмін, складає 40%. На цьому ж етапі можна визначити частку теплоти, яка при нагріванні другої труби 1 шляхом випромінювання або природного конвективного теплообміну розсіюється в навколишнє середовище. Так, наприклад, при співвідношенні об'ємних температур тіл труб  $\frac{130}{110 - 20} = 1,444$  вказана частка теплоти складає 44,4%.

*Другий етап.* Попередньо знявши теплоізоляцію 5 і вилучивши нагрівальний пристрій 2 з другої труби, можна в лабораторних умовах визначити втрати теплоти шляхом випромінювання і природного конвективного теплообміну з її поверхонь.

В результаті усталеного теплового стану труби 1 (за мінімального температурного градієнту по товщині труби), одержаного на першому етапі, фіксують проміжок часу випромінювального і природного конвективного охолодження. Після цього визначають інтенсивність випромінювання і природного конвективного теплообміну, тобто коефіцієнт тепловіддачі від поверхонь другої труби 1 в заданих інтервалах температур.

Так, наприклад,  $Q = IU\tau$ , кДж (кількість теплоти, затраченої на прогрівання першої труби 1);  $I$  – сила струму, А;  $U$  – напруга, В;  $\tau$  – час, с. З іншого боку, така ж кількість теплоти ( $Q$ ) розсіюється з поверхонь ( $F$ ) другої труби 1 за час ( $\tau$ ) за різниці температур ( $t_2 - t_0$ ). У цьому випадку температура  $t_2$  є усередненою для внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби. І, зрештою, коефіцієнт тепловіддачі складе

$$\alpha = \frac{Q}{F\tau(t_2 - t_0)}. \quad (1)$$

*Третій етап.* На цьому етапі визначаються втрати теплоти шляхом випромінювання і природного конвективного теплообміну з поверхонь другої циліндричної труби.

Для реалізації третього етапу знімають торцеву теплоізоляцію 5 і нагрівальні пристрої 2 та від'єднують від клем 3, а також від термоелектродів термопар 4 з обидвох труб.

Після цього циліндричні труби 3 (рис. 2) по чергово поміщають в камеру 1 і до термоелектродів термопар 4 на їхніх внутрішній і зовнішній поверхнях під'єднують електропроводи.

Особливістю випробовування другої труби 3 є те, що шляхом подавання через сопла 9 повітря або рідин з різними термодинамічними параметрами на зовнішню поверхню з'являється можливість імітувати в камері 1 конвективний теплообмін.

Після пропускання нагрітих газу або рідини через порожнини першої і другої труб, установлених по чергово в камеру 1, через співвідношення заміряних об'ємних температур другої труби ( $t_2 - t_0$ ) до першої ( $t_1$ ) за однакової складової кондуктивного теплообміну за залежністю  $\left(1 - \frac{t_2 - t_0}{t_1}\right)$  визначають частку теплоти, яка розсіюється в навколишнє середовище з поверхні другої труби шляхом випромінювання і природного конвективного теплообміну. Аналогічно визначається частка теплоти, що розсіюється з поверхонь першої труби в навколишнє середовище шляхом випромінювання і природного конвективного теплообміну. Так, наприклад, при відношенні об'ємних температур тіл труб 3  $\frac{125}{120 - 20} = 1,25$  вказана частка теплоти складає 25,0%.

Порівняльний аналіз методів оцінки теплових втрат ділянок трубопроводів наземного призначення вказав на такі переваги запропонованого температурного методу:

- можливість поетапного визначення теплових втрат ділянок трубопроводів різних діаметрів у лабораторних умовах;
  - теплота, що вноситься в ділянку трубопроводу, забезпечується електричним струмом за допомогою нагрівального пристрою, що дає змогу оцінити складову кондуктивного теплообміну;
  - визначення втрат теплоти, викликаних конвективним теплообміном, проводиться за однаковий час шляхом порівняння нагрітої не теплоізованої і теплоізованої від навколишнього середовища ділянок трубопроводу в лабораторних умовах;
  - визначення інтенсивності теплообміну при природній і вимушеній конвекції ділянки трубопроводу проводиться при її охолодженні від фіксованого теплового стану до температури довкілля в лабораторних умовах.
- Визначення товщини шару ізоляції трубопроводу здійснюємо за залежністю вигляду

$$\sigma = \lambda_i F \frac{t_{3.m.} - t_{3.із.}}{Q}, \quad (2)$$

де:  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції,  $Вт/(м \cdot ^\circ C)$ ;  $F$  – площа поверхні теплоізоляції,  $м^2$ ;  $t_{3.m.}$ ,  $t_{3.із.}$  – температури зовнішньої поверхні: трубопроводу і теплоізоляції,  $^\circ C$ ;  $Q$  – кількість теплоти, що передається від робочого трубопроводу через його стінку і теплоізоляцію,  $Вт$ .

## Висновки

Запропоновано методи нагрівання та охолодження в лабораторних умовах ділянок трубопроводів наземного призначення при транспортуванні газу і рідини, що дає змогу визначити втрати теплоти шляхом випромінювання, природного і вимушеного теплообміну з поверхонь трубопроводу в навколишнє середовище, а також шляхом кондуктивного теплообміну в тіло стінок труб. Запропоновано залежність (2) для визначення товщини шару ізоляції трубопроводу.

## Література

- 1 Кириллин В.А. Основы экспериментальной термодинамики / В.А.Кириллин, А.Е.Шейндлин. – М.–Л.: Государств. энергетич. из-во, 1950. – 310 с.
- 2 Боков В.С. Исследование теплового взаимодействия газопровода и грунта в северных районах при охлаждении газа в аппаратах воздушного охлаждения: дисс. канд. техн. наук: 05.15.07 / Боков Василий Степанович. – М., 1976. – 125 с.
- 3 Поршаков Б.П. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): учебник для вузов / Б.П.Поршаков, Р.Н.Бикчентай, Б.А.Романов. – М.: Недра, 1987. – 333 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію*

*10.09.10*

*Рекомендована до друку професором*

*В.Я.Грудзом*